

SDOs: ORIGEN, DINÁMICA Y ESTADOS FINALES

Paper de Gomes et al. (2008) (libro TNOs pg. 259)

El escenario de Duncan y Levison (1997) sobre el origen del SD, sugiere que el SD puede ser el remanente de una población primordial de objetos dispersados por Neptuno desde el origen del Sistema Solar. En este trabajo se analiza en que medida pueden coexistir una población remanente y una transitoria.

- Reveen la dinámica del SD en especial las resonancias de mov.medios y de Kozai.
- Se discute el origen del SD tanto como proveniente del KB y como remanentes de un proceso de scattering durante la migración de Neptuno.
- Analizan la importancia del acoplamiento de las resonancias de MM y de Kozai para aumentar el el perihelio de los SD produciendo objetos de alto perihelio fósiles y “vivos”.
- Analizan otros mecanismos para implantar los objetos detached
- Exploran los diferentes estados finales.

CONFIGURACIÓN ORBITAL

Toman como SDOs aquellos TNOs con $q > 30$ AU y $a > 50$ AU.

Los objetos del disco extendido (Extended scatters disk) o detached son aquellos con $q > 40$ UA.

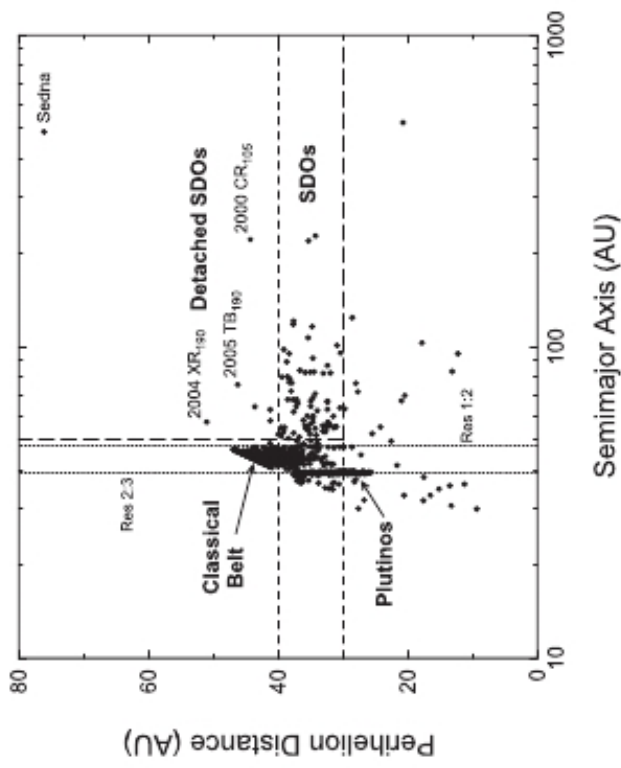


Fig. 1. Distribution of the different populations of outer solar system bodies in the plane a vs. q . The scattered disk objects occupy the upper right portion of the figure limited by the thick dashed line. The zone of the high-perihelion (or detached) SDOs ($q > 40$ AU) is also indicated and the names of the most prominent members are labeled. The objects were taken from the Minor Planet Center's website (cfa-www.harvard.edu/iau/Ephemerides/Distant/Soft00Distant.txt).

MASA DEL SD

Trujillo et al. (2000) estima la población de SDOs con radio $R > 50$ km en 3.1×10^4 objetos y una masa total de $0.05 M_T$.

Para esto consideran la muestra de 4 SDOs descubiertos hasta ese momento, los cuales tenían $q \leq 36$ AU.

Si consideramos los SDOs hasta $q = 40$ UA, entonces deberíamos multiplicar la estimación de Trujillo et al. (2000) al menos por un factor 2.



Se adopta una población de SDOs de $\sim 6 \times 10^4$ objetos con $R > 50km$.

Las estimaciones obtenidas a partir del survey de Larsen et al. (2001) concuerdan con lo anterior.

Trujillo et al. (2001) encuentran que la distribución de tamaños diferencial de los TNOs clásicos sigue una ley de potencias:

$$dN \propto R^{-s} dR$$

$$\text{donde } s = 4.0 \pm_{1.3}^{0.6}$$

Si suponemos que esta ley vale para SDOs y que vale hasta $R = 1 \text{ km}$ (ojo = exponente), entonces la población de SDOs:

$$N_{SDO}(R > 1km) = 6 \times 10^4 \times 50^{s-1}$$

Tomando $s = 4$, se obtiene $N_{SDO}(R > 1km) = 7.5 \times 10^9$, pero dado el error en s N esta entre 1.1×10^9 y 7.8×10^{10} . (1 orden de magnitud de error)

Bernstein et al. (2004) sugiere que la pendiente de la distribución de tamaños tiene un quiebre en $D \sim 100$ km y se hace más plana para $D < 100$ km.

Esto implica una masa total menor de $\sim 0.01M_T$ para el Cinturón clásico, sin embargo el survey de Bernstein (HST) cubre un área muy pequeña y descubre solo 3 TNOs pequeños (D entre 25 y 50), por tanto la estadística es pobre.

Delsanti y Jewitt (2006) estiman una masa del disco clásico de algunos centésimos de M_T , teniendo en cuenta que los TNOs grandes tienen albedos altos.

También concluyen que la masa del SD tiene que ser mayor que la masa de las otras componentes.



Dadas las incertezas se estima que la **masa del SD podría estar entre 0.01 y 0.1 M_T** , comparable a la masa del Cinturón clásico.

DINÁMICA DEL SD

En la región TN los objetos están tan poco ligados al Sol, que las órbitas heliocéntricas muestran oscilaciones importantes de corto período, debido a los efectos gravitatorios de los planetas gigantes sobre el Sol.

El semieje mayor es el elemento más afectado y oscila alrededor de un valor medio que coincide con el a baricéntrico.

Por esta razón los elementos orbitales baricéntricos representan mejor los estados dinámicos.

Un TNO puede experimentar básicamente 2 tipos de evolución dinámica:

- Una evolución estocástica debida a encuentros con los planetas asociada con una evolución al azar de a , la cual puede ser estudiada por simulaciones numéricas o métodos estadísticos
- Una evolución más regular debida a los efectos gravitatorios continuos y regulares de los planetas, la cual conserva un valor medio de a y puede estudiarse según la teoría secular.

La evolución estocástica ocurre en general cuando $q < 36$ UA y se debe principalmente a encuentros con Neptuno (Duncan y Levison, 1997 y Fernández et al., 2004).

Luego de cada encuentro la cte de Tisserand T debe conservarse y la evolución es un random-walk en el espacio de energías, conservando su perihelio cerca de la órbita de Neptuno. Para q grandes en el SD o si el objeto es transferido hacia dentro del Sistema Solar, la conservación de T ya no se aplica.

Con respecto a la evolución más regular, se pueden distinguir dos tipos de dinámica.

En un caso, la evolución está dominada por términos de largo período mostrando una evolución lenta de los elementos orbitales, llamada dinámica secular.

El el otro caso, la dinámica es dominada por los términos resonantes de las ecuaciones de planetarias de Lagrange.

Dinámica secular

Para $q \geq 36$ AU, no son posibles encuentros cercanos con los planetas y entonces los objetos experimentan una evolución más regular.

En particular a baricéntrico oscila alrededor de un \bar{a} y ϖ y Ω tienen tasas de precesión constantes.

La invariancia de \bar{a} implica que la cantidad: $H = \sqrt{1 - e^2} \cos i$ llamada dinámica de Kozai, se conserva. (i se mide respecto del plano invariante del SS).

La conservación de H es análoga a la de T, pero la primera es una propiedad inducida por la dinámica de todos los planetas (no solo Neptuno).

En el SD las frecuencias de circulación ϖ y Ω son muy pequeñas en comparación con las frecuencias fundamentales del SS, por lo tanto no son posibles resonancias seculares en el SD.

Si i es baja, un SDO tendrá una evolución estable (a, e, i cuasi ctes y precesión ctes de los ángulos). Si i es alta, puede ocurrir una resonancia de Kozai y esto puede modificar e e i .

Resonancias de Movimientos Medios

Varias simulaciones numéricas han mostrado que los SDOs tienen una evolución estocástica en sus a y experimentan capturas temporarias en resonancias de movimientos medios.

Si designamos a una resonancia (con Neptuno): $|p + q| : |p|$, entonces su posición estará dada por:

$$a_{res} = \frac{a_N}{(1+m_N)^{1/3}} \left(\frac{p}{p+q} \right)^{2/3}$$

$q > 0$ es el orden de la resonancia y p es el grado, que es negativo para resonancias exteriores.

En el SD todas las resonancias son exteriores a Neptuno ($p < 0$).

Gallardo (2006 a,b) muestra que es posible asociar una “Fuerza” (strength) a cada resonancia que depende de los elementos orbitales (e, i, ω) de la órbita resonante.

La Fuerza de una resonancia crece con la excentricidad de tal forma que para órbitas de muy alta excentricidad, todas las resonancias son lo suficientemente fuertes como para ser relevantes.

También se encuentra que las resonancias son más fuertes para órbitas con alta inclinación.

Las resonancias del tipo 1:n y 2:n con Neptuno son relativamente fuertes y aisladas de las demás, por tanto deben ser las más pobladas (ver fig2).

Otras resonancias pueden ser fuertes, pero están rodeadas por otras resonancias fuertes, de manera que un SDO que cae en alguna de ellas evoluciona por “resonance stiking” (ver ejemplos).

Un mecanismo posible para la captura en una resonancia es la evolución estocástica del a causada por las perturbaciones planetarias.

Eventualmente $a \sim a_{res}$ y los términos resonantes de la función perturbadora comienzan a dominar la evolución orbital.

Una vez que un SDO evoluciona en una resonancia de MM, la teoría predice que el objeto tendrá libraciones de a , e e i con la misma frecuencia de ángulo crítico ($\sigma = (p + q)\lambda_N - p\lambda - q\varpi$).

Sin embargo en el SD se observa frecuentemente que e e i muestran notables variaciones lentas superpuestas a las libraciones del mov. resonante.

Esto no se debe solo al MMR sino a una evolución secular de ω que impone variaciones de e e i . Es decir en general se dan resonancias de Kozai dentro de las MMR.

EL SD: REGISTRO PRIMORDIAL O POBLACIÓN TRANSITORIA?

Plantea dos hipótesis:

- Producto de la formación de los planetas jovianos y de la migración planetaria (que fue causada por la dispersión masiva de planetesimales).
- SDOs provienen del cinturón clásico a través de colisiones (Davis y Farinella, 1997) y la difusión lenta por medio de MMR y Res. seculares.

Migración a través de un disco de planetesimales

A partir de las ideas sobre la formación planetaria sabemos que en cierto momento inicial, debió haber en el SS un disco de planetesimales que se extendió desde la región planetaria hasta el límite del EKB.

Esto permitió el intercambio de energía y momento angular de los planetas y los planetesimales, lo cual produjo la migración de Neptuno, Urano y Saturno hacia afuera y Júpiter hacia adentro (Fernández e Ip (1984)).

Entonces en algún instante primordial los planetas debieron estar en órbitas con separaciones mutuas menores.

La separación orbital original se discute en varios trabajos previos, por ej Tsiganis et al. (2005) del modelo de Niza y es posible que Neptuno haya estado originalmente a 15 o 20 UA del Sol.

EL mecanismo de migración es alimentado por un gran número de encuentros cercanos entre los planetas y planetesimales hasta que Neptuno alcanza el límite externo del disco.

En este punto hay un gran número de planetesimales en órbitas que han sufrido el scattering de Neptuno, pero la masa total de estos no alcanza para seguir produciendo la migración del planeta.



Cuando la migración planetaria se calmó, es lógico que debió existir una población dispersada por Neptuno



La población actual del SD es el remanente de una población más grande de objetos que tenían perihelios mayores que el de Neptuno cuando la migración planetaria se calmó (Duncan y Levison (1997)).

Las estimaciones de la masa del disco primordial de planetesimales va desde $50 M_T$ (Hahn y Malhotra, 1999) hasta $35 M_T$ (3 papers del modelo de Niza: Tsiganis et al., 2005, Gomes et al., 2005a y Morbidelli et al., 2005).

Este número está basado en la dinámica de la migración en un disco truncado que da las posiciones finales de los planetas como las actuales (Modelo de Niza).

Trabajos con simulaciones numéricas del proceso de migración extendidos a la edad del SS da como resultado un disco actual remanente en el SD de 0.2 0.4 % de la masa original del disco, (Gomes, 2003 y Gomes et al. (2005b)).

La simulación del modelo de Niza para explicar el origen del bombardeo tarío sobre los planetas terrestres, extendida a la edad del SS, da una masa total de la población TN actual de $0.14 M_T$ con $0.08 M_T$ en el SD ($0.22 \% M_{inicial}$).

Estos números concuerdan con las estimaciones observacionales de la masa que vimos antes y confirmarían el origen del SD por la interacción de un disco de planetesimales primordial interactuando con un Neptuno migrando.

Otro test que se puede hacer para verificar el origen del SD es estudiar si la distribución orbital de SDOs actuales concuerda con aquella obtenida mediante el modelo de Niza (paper del LHB).

Comparan las distribuciones de q e i de los SDOs reales y los obtenidos de la integración numérica por la edad del SS.

Se observa que los puntos de ambas muestras ocupan aprox. el mismo espacio de elementos orbitales (q,i) .

Sedna es una excepción lo cual se debe a un origen diferente.

Otra diferencia es que hay más inclinaciones bajas en los observados que en el modelo, pero se puede deber a un bias observacional...

Población transitoria desde el Cinturón clásico y otros mecanismos

Analizan la contribución del Cinturón clásico, ortas poblaciones y otros mecanismos al SD.

- Duncan et al (1995): analizan la estabilidad de partículas en la región TN y encuentran que existen inestabilidades dinámicas débiles capaces de producir un cierto flujo de objetos hacia el SD.
- Nesvorný y Roig (2001): encuentran rutas de escape desde los bordes caóticos de las MMR 2:3 y 1:2 hacia el SD. También muestran que otras resonancias más débiles son posibles rutas de escape al SD.
- Lykawka y Mukai (2006) encuentran que dentro de la resonancia 4:7 con Neptuno ($a = 43.6$ UA) hay regiones de gran movilidad y que objetos en esta región dejan la resonancia y son luego dispersados por Neptuno.
- Di Sisto et al (2007) estudian evolución del SD y Di Sisto et al (2010) evolución de plutinos...



La difusión caótica asociada con las resonancias ha producido una erosión gradual del EKB primordial que continua actualmente.

Además de la propia dinámica de la región TN, los objetos que se encuentran en regiones que son estables por la edad del SS pueden ser removidos a regiones inestables por dos mecanismos:

1. Encuentros con TNOs de ~ 1000 km: Yu y Tremaine (1999) muestran que encuentros de plutinos con Pluton tienen algún efecto en sacar los objetos de la resonancia, sin embargo otros trabajos muestran que el efecto no es importante.
2. Actividad colisional: Davis y Farinella (1997) y Stern y Colwell (1997) hacen simulaciones de la evolución colisional en la zona TN. Concluyen que el EKB es una población colisionalmente evolucionada y estiman que se inyectan fragmentos producidos en las colisiones hacia regiones inestables y luego al SD.

Entonces, además del SD proveniente del proceso primordial de scattering por Neptuno, existe un cierto flujo de objetos de las otras poblaciones de la región TN (clasico y MMR) hacia el SD.



Entonces en un escenario en estado estacionario (como sería el actual), la masa de los SDOs que provienen del resto de la región debería ser una fracción pequeña de la masa total de estas poblaciones.

Sin embargo, como mostramos antes, las evidencias observacionales indican que el SD y la población clásica tienen masas comparables.



Podemos concluir que los SDOs más grandes deben ser remanentes de una población primordial mucho más grande de objetos dispersados por Neptuno durante su migración primordial. Además como vimos, las simulaciones de este modelo (Niza) reproducen la masa actual estimada a partir de las observaciones.

LA FORMACIÓN DEL SD DE PERIHELIO GRANDE

Hasta la fecha sept. 2006 hay 7 objetos con $a > 50$ AU y $q > 40$ AU es decir detached.

No hay acuerdo sobre si estos objetos provienen del SD o tienen otro origen.

En este trabajo se discute algunos mecanismos que podrían elevar el q de los SDOs para pasar a ser detached.

- **Transferencia de SDOs desde un q bajo hasta q alto via dinámica secular dentro de una MMR**

Dentro de una MMR el efecto secular más importante es la Resonancia de Kozai.

El mecanismo acoplado de MMR + KR es capaz de crear SDOs con perihelios altos de hasta 60 UA (ver fig4).

A 4 de los 7 objetos con $q > 40$ UA se les puede asociar este mecanismo.

En el mecanismo MMR +KR, la excentricidad e inclinación de un objeto están acoplados tal que $H = \sqrt{1 - e^2} \cos i$ se conserva. Esto permite ver la q mínima permitida para un cuerpo y chequear si pudo venir del SD por este mecanismo. (Fig. 5)

- Perturbaciones por agentes externos

Existen 2 objetos detached con semieje grande cuyo origen no se puede explicar por el mecanismo MMR + KR: 2000CR₁₀₅ y 2003VB₁₂ Sedna.

2000CR₁₀₅ tiene un $a = 221$ UA y $q = 44.4$ UA.

Existen simulaciones numéricas que obtienen objetos con a y q cerca de los de 2000CR₁₀₅, son mucho más probables objetos con igual q pero menor a .

Esto implica que deberían haberse descubierto muchos objetos en órbitas con a menor.

2003VB₁₂ Sedna tiene $a = 505$ UA y $q = 76$ UA.

Es muy probable que Sedna sea el primero de una población de objetos al menos un orden de magnitud más masiva que el EKB.

Una teoría que da buenos resultados para el origen de sedna, se basa en la formación del Sol en un cúmulo de estrellas.

Esta teoría considera que los objetos dispersados por los planetas gigantes en un instante primordial pueden haber aumentado debido al efecto de los pasajes estelares y efectos de marea de la nube molecular de gas (Fernández y Brunini, 2000; Brasser et al., 2006).

En este caso, Sedna y $2000CR_{105}$ se encuentran bien dentro del cúmulo de objetos de perihelio aumentados por esos mecanismos.

Otro mecanismo para crear objetos de perihelio alto puede ser producido por las perturbaciones de una posible compañera solar sobre los SDOs (Gomes et al. (2006)). Este efecto se produce por resonancias seculares o de Kozai inducidas por la compañera.

Gladman y Chan (2006) consideran que uno o más cuerpos del tamaño de la Tierra fueron dispersados por Neptuno en el SS temprano (sugerido inicialmente por Ip (1989) y Petit et

al. (1999)). Este planeta interactuando con los SDOs incrementaría los perihelios de algunos.

Otro mecanismo es el de un origen extrasolar de los objetos detached. El Sol habría capturado objetos de discos de planetesimales de otras componentes del cúmulo en que se formó como las enanas marrones. El problema con esto es que no se sabe si estas estrellas tienen discos con objetos grandes como Sedna.

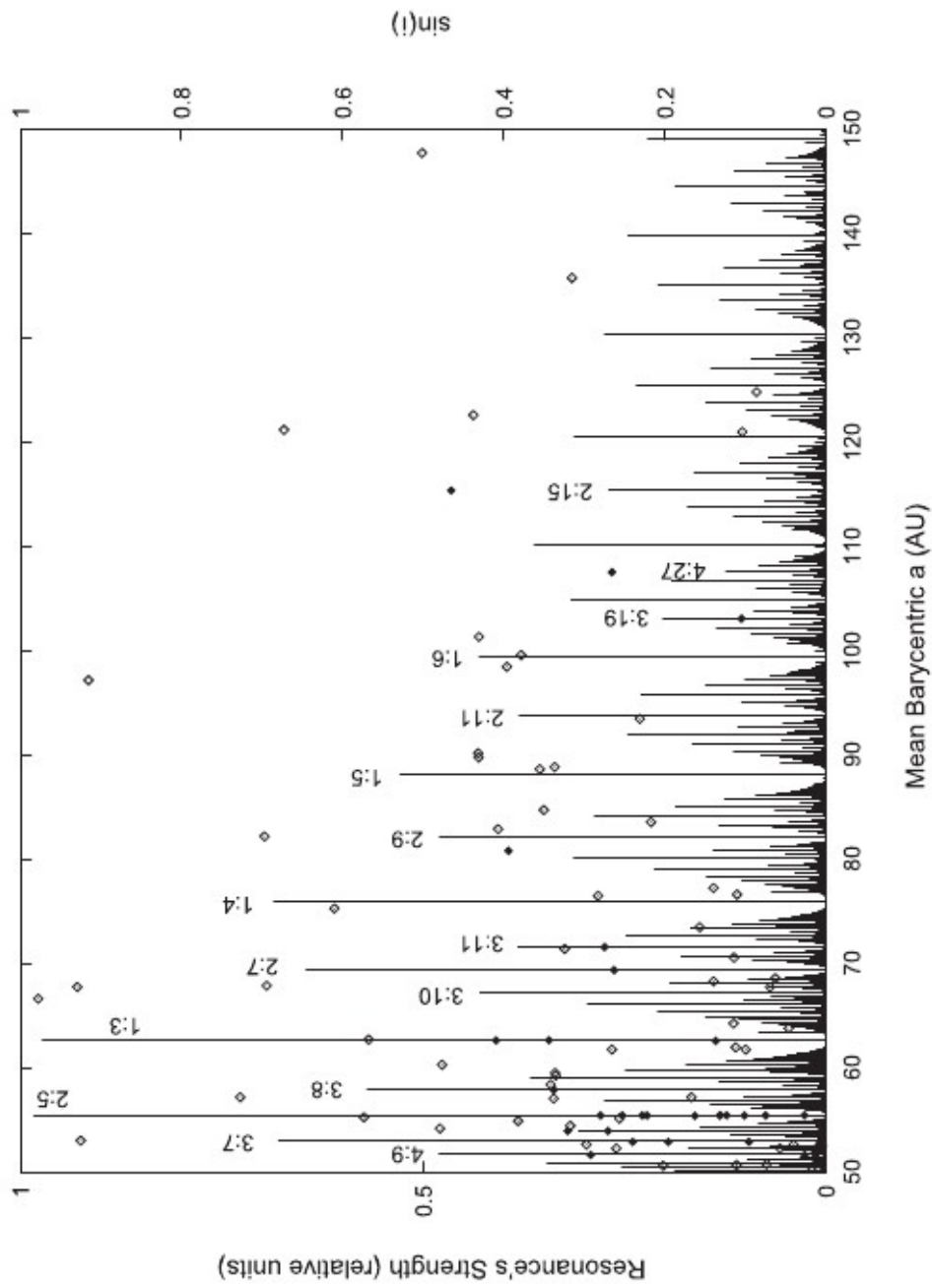


Fig. 2. Localization and strength of the MMRs in the region $50 < a < 150$ AU. The strengths of all resonances were calculated assuming orbits with $q = 32$ AU, $i = 20^\circ$, and $\omega = 60^\circ$. The known SDOs are plotted in the $(a, \sin i)$ parametric plane in order to appreciate their distribution with respect to the resonance's positions. Full circles indicate objects identified in MMRs with librating critical angles (see Table 1) and open circles indicate objects that were not associated with a resonance. In this plot a is the mean barycentric value after a numerical integration of 10^5 yr.

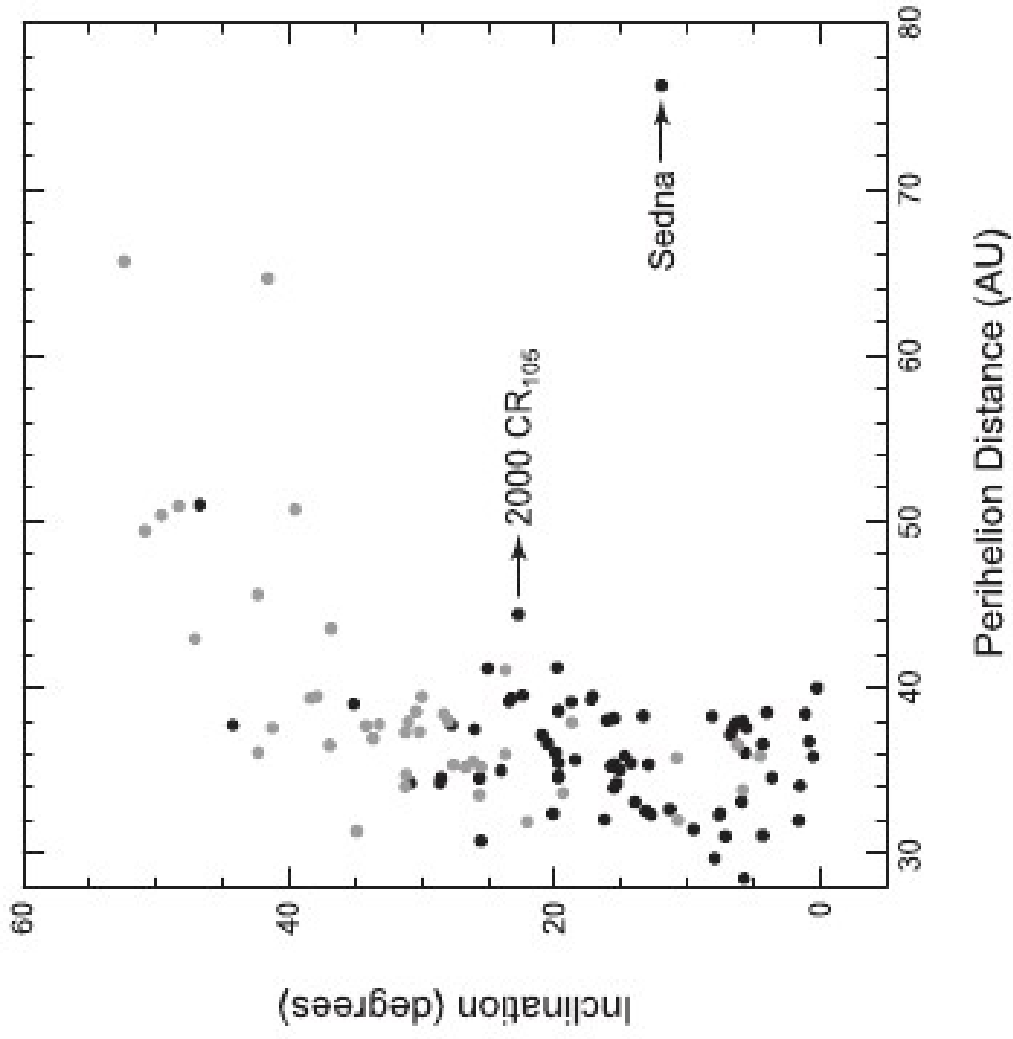


Fig. 3. Distribution of perihelion distances with inclinations for real scattered objects (black) and objects obtained in a numerical simulation extended to solar system age (gray). The numerical simulation followed the LHB model (*Tsiganis et al., 2005; Gomes et al., 2005a*).

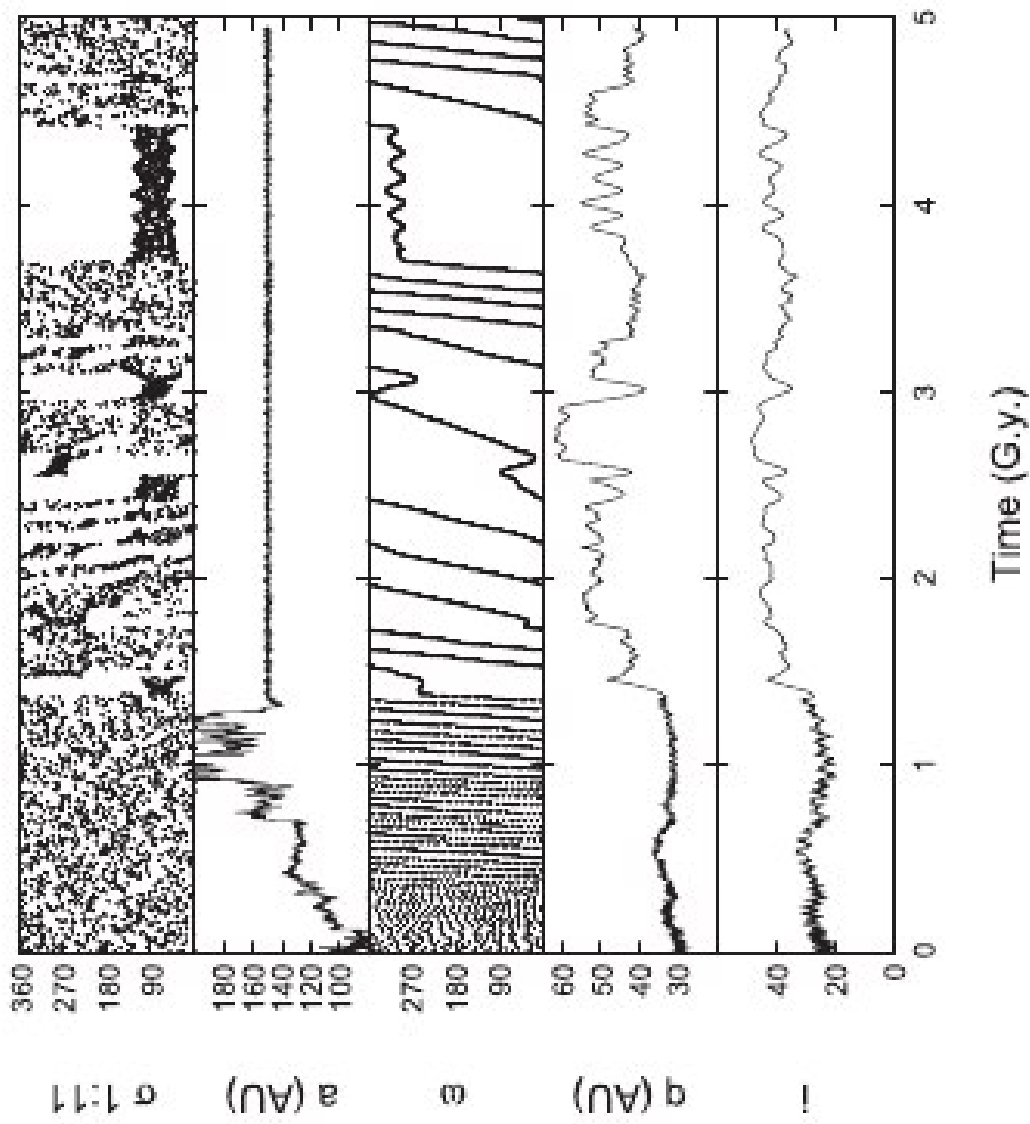


Fig. 4. Orbital evolution of a test particle captured into the 1:1 resonance and then entering into the Kozai resonance. The test particle is a clone of SDO 1999 RZ₂₁₅ (Gomes *et al.*, 2005b).

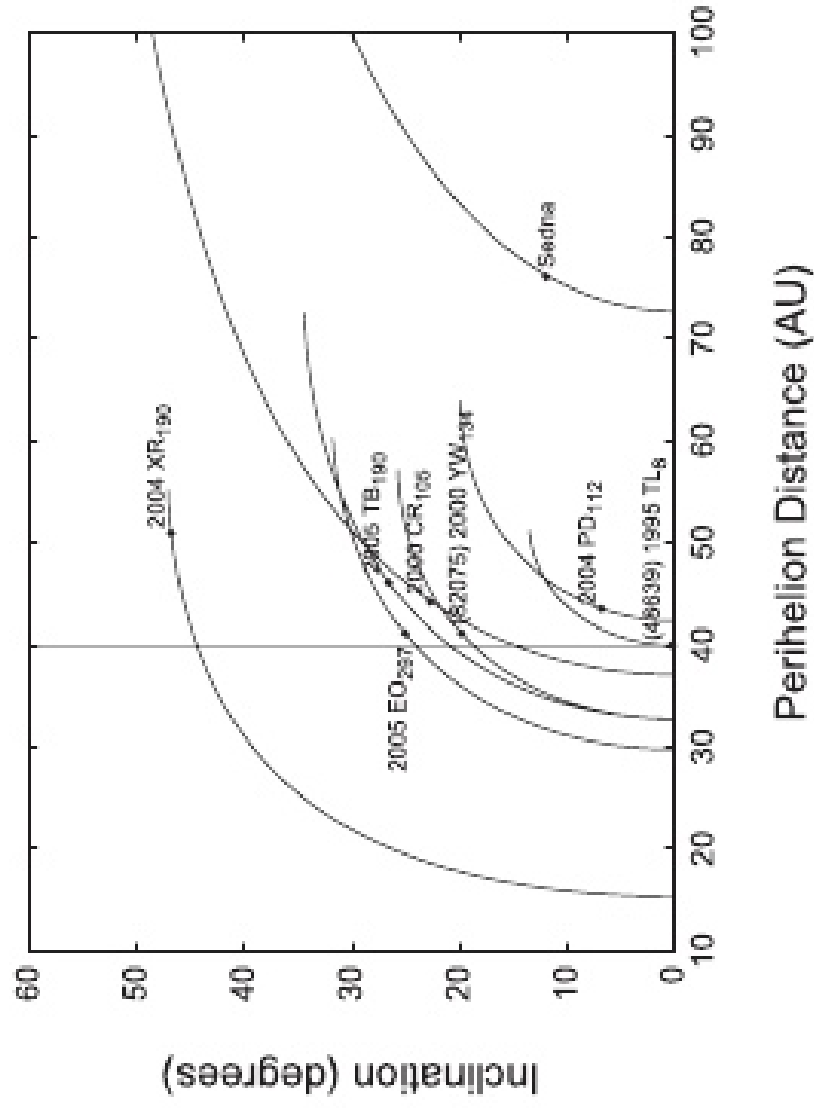


Fig. 5. Location of seven observed detached objects plus 1995 TL₈ in the parametric plane (q, i) with the corresponding curves $H = \text{constant}$. These curves show the possible evolution of e and i due to the KR.